

溢流坝闸墩三维光弹试验研究

周鸿钧 王文勇 王箴

(水利系)

(基础部)

提 要

应用三维光弹冻结应力和切片方法,分析研究了溢流坝闸墩上的应力分布和应力集中现象。研究中使用的环氧树脂模型,是用带有硅橡胶里衬的水泥模壳精密浇注而成。这种模壳可以多次使用。采用切力差法计算应力和分离主应力,确定了在对称荷载和非对称荷载作用下闸墩上某些截面的应力分布、主应力轨迹线和最大主应力等值线。研究成果可供工程技术人员设计闸墩之用。

一、概述

溢流坝上通常设置闸墩,用以支承交通桥和启闭闸门之用。对于采用弧形闸门的溢流坝,由弧门支腿传来的水压力,一般是通过凸出闸墩的牛腿传至闸墩再传给溢流坝体。此外,闸墩还承受上游和侧向水压力,闸墩顶部的竖向荷载和闸墩自重的作用。从结构上看,闸墩为底部弹性固结于溢流坝体,其他三边自由的厚板,承受着闸墩本身平面内和平面外的荷载,所以它的应力状态是极为复杂的。

过去对闸墩常常是采用单宽悬臂梁计算,这显然是不合理的,它没有考虑闸墩的整体性,往往给出偏大的结果。后来有人建议将闸墩视为底部固结、其他三边自由的矩形板,按弹性理论计算^[1]。由于在计算时将作用于牛腿处的集中力和弯矩转化到闸墩下游角点处,显然这就完全改变了闸墩的应力状态。不少计算例子说明往往得出不合理的结果,特别是在牛腿附近应力复杂的区域内更是如此。对于闸墩过去也曾进行过一些试验研究工作,但对其应力状态仍然不是很清楚,缺乏统一的认识。特别是在近代,由于钢结构设计上的改进,采用的弧形闸门尺寸愈来愈大,通过牛腿传递的荷载就更大了,往往在几百吨甚至千吨以上,因此进一步阐明闸墩的应力状态,进行安全经济合理的设计就更加显得重要了。

为了进一步弄清闸墩的应力状态,我们结合××水库重建工程溢流坝闸墩进行了三维光弹试验。××水库重建工程在主河道上布置了混凝土溢流坝,溢流坝上布置了八个表孔和一个底孔,最大坝高为47.5米。表孔堰顶高程为104米,每孔净宽14米,闸墩厚度为3米,长29.5米,设有14×14米的弧形钢闸门,在其上游设有检修平板钢闸门。设计洪水位117.5米,弧门推力1500吨,由钢筋混凝土牛腿和闸墩承受,再加上侧向水压力,闸墩和牛腿应力较为复杂,一般的结构配筋计算都不完善,很难了解其应力分布情况,故需进行应力试验,以充分

了解有关部位的应力分布,便于设计计算工作。

现将研究情况和结果简要分述如后。

二、模型试验

(一) 试验条件

1、模型比例 1:200

2、要求观测闸墩与坝体连接部位和牛腿部份有关部位的应力。为了简化模型制做,可取坝体高程84.0米以上部分。

3、荷载

(1) 闸墩、牛腿混凝土自重 ($\gamma_c = 2.45$ 吨/米³) ;

(2) 弧门推力,设计洪水117.5米时关门,一侧为750吨,推力方向与水平面夹角8度0分,与闸墩中心线夹角为8度35分40秒,着力点离墩面60厘米;

(3) 水压力,弧门关闭时,闸墩承受弧门前设计洪水117.5米的静水压力。过水时按动水压力计算,即取 $\frac{1}{5} (117.5 - 104) = 2.7$ 米水深的静水压力;

(4) 坝顶交通桥的自重和支撑作用均忽略不计。

4、荷载作用情况

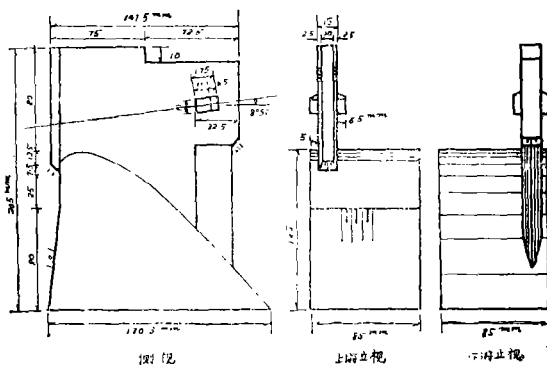
(1) 闸墩两侧弧门关闭(即对称情况);

(2) 闸墩一侧过水,一侧关门(即不对称情况);

(3) 闸墩自重。

5、溢流坝闸墩三维光弹模型尺寸如图1所示。

需要说明的是,为了简化,没有考虑闸墩顶部竖向荷载作用,没有考虑修理门槽的影响。为了便于加载,将闸墩上游园弧形墩头简化为折线形状。虽有这些局部简化,但对闸墩牛腿附近的应力状态并无实质性的影响。



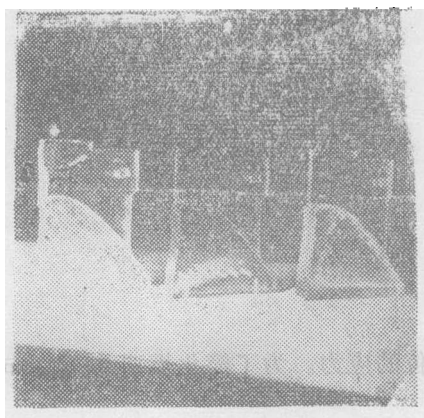
(二) 试验方法

光弹性试验的优点在于通过观测受力模型,可以得到全场的主应力差线和主应力等倾角线,根据这些资料,通过作图和计算可以得到全场的主应力轨迹线和应力分布图形。

1、模型制作

溢流坝闸墩是三维结构,用一般的机械很难将模型加工成型。为此我们采用精密铸造得到溢流坝闸墩三维光弹模型。模型的最大尺寸为16.5厘米×21厘米×8厘米,见照片1。

图1 闸墩模型尺寸



照片1 闸墩模型

精密铸造模型的阴模采用室温硫化硅橡胶,硫化硅橡胶可以在20℃条件下,加入3%的交链剂和1.5%的触媒剂一次浇注而成。这种模具的收缩率一般在1%以下,能满足模型尺寸准确度的要求,而且它还具有良好的弹性,不会在环氧树脂模型成型时因收缩而产生内应力,这种硅橡胶与木材、金属和环氧树脂等材料均不粘连,不需另外使用脱模剂,而且闸墩的突出部分,如牛腿等均可以准确地一次脱出,同时阴模还可以重复使用。

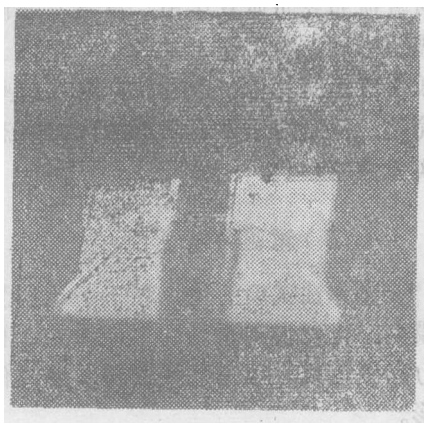
起初,我们用有机玻璃做成准确的阳模,用纯硅橡胶充填在6毫米厚的铝板模型箱中做阴模,浇注环氧树脂模型后,发现模型厚度方向尺寸收缩率大,特别是闸墩的中部,厚度方向的收缩率达5%以上,不符合要求。

经研究认为主要是闸墩部份和坝体部分厚度相差较大(3倍以上),因此阴模中闸墩部分硅橡胶厚,坝体部分硅橡胶薄,由于自重作用,闸墩部分硅橡胶变形大了。另外在浇注模型时是将阴模倒置的,环氧树脂混合液自重产生较大的压力加在坝体与闸墩相接的面上,使闸墩部分硅橡胶更加压缩膨胀,且无法弹性恢复,因而使得模型尺寸误差大,无法使用。

为了解决上述问题,我们采用了用水泥砂浆作外壳,内衬3~5毫米厚的硅橡胶做阴模里衬。这种水泥硅橡胶阴模的优点是硅橡胶层薄变形小,但又有足够的弹性,在环氧树脂混合物聚合成型时能自由收缩而不会引起不可消除的内应力。同时硅橡胶和水泥壳粘结很牢,保证硅橡胶里衬尺寸的准确性。

水泥壳硅橡胶阴模制作的简单程序如下:用有机玻璃做成准确的三维闸墩阳模,再用木料做一个形状与有机玻璃阳模相似,而各方向尺寸大3~5毫米的木模,用此木模翻制水泥壳阴模,水泥壳阴模分为上下两半,在模壳侧面刻上分缝定位准线控制位置。然后将有机玻璃阳模用小块固化硅橡胶支承在水泥壳阴模中,保持3~5毫米缝隙,用压灌法将107[•]和106[•]硅橡胶混合物填充到此缝隙中,经固化成型后即可拆模。在室温20℃条件下,压铸硅橡胶24小时就完全固化。所得水泥壳硅橡胶阴模见照片2。实践证明,这种水泥壳硅橡胶阴模制得的光弹模型收缩率小(1%左右),尺寸准确,表面光洁度好,初应力小,比较经济,而且阴模可以重复使用。

水泥壳阴模的灰砂比为1:1,,拌以适量水份,使拌合物可塑而不流动。浇注的水泥壳养护2~3天后,经一天自然风干,再在60℃的干燥箱中烘烤一天即可用来灌注硅橡胶里衬,从而制得水泥壳硅橡胶阴模,用此阴模即可浇注环氧树脂光弹模型。水泥模壳的上、下两半,在分型面上必须刻好定位准线,以保证浇注模型的准确尺寸。浇注模型后拆模时应多加小心,以免将模型或阴模里衬弄坏。在浇注环氧树脂混合液前,应将水泥硅橡胶阴模洗干净,尤其是硅橡胶里衬的表面必须洁净,并用泡沫海绵等将水吸干,不使留有水痕,以免将来模型表面不光滑。根据定位准线位置,将阴模上、下分型面合好,并在合缝面



照片2水泥硅橡胶阴模

上小心地涂上硅橡胶,以保证密封,防止环氧树脂混合液漏出。再在水泥壳阴模外安好钢制夹具,或用绳索捆绑,然后将合模后的阴模放入50℃的烘干箱中预热4小时后即可用来浇注环氧树脂混合液。

浇环氧树脂混合液时采用敞浇法,将阴模倒置,并稍稍倾斜,然后将混合液徐徐贴壁流入阴模,防止混合液直冲已经浇入的混合液而出现气泡。浇注完混合液后,静置半小时,以便气泡继续散逸,如发现残存的气泡不能自由逸出时,应用细金属丝将其勾出,然后放入烘箱进行固化。

浇注模型的材料采用无锡618*环氧树脂,重量配比为环氧树脂:失水苹果酸干=100:35,经60℃恒温一次固化成型,脱模后在油浴中进行二次固化。二次固化后的模型经过清理,削去毛刺,在使用前进行一次退火。

需要指出的是,采用硅橡胶阴模浇注模型时,环氧树脂混合液的浇注温度不宜超过60℃,否则会在硅橡胶和模型表面产生相互渗透,形成很细的麻面,影响光学效应及观测。

2、加载冻结

对模型加载必须考虑到与原型荷载相似,即荷载性质相同,荷载大小成比例。在选择模型加载比例时,应考虑模型材料的光学、力学性能在比例极限内获得足够的观测条纹,以保证实验精度,同时又不使模型产生过大的变形而扭曲。

本试验中,作用于模型上的荷载主要是牛腿部分的集中力,上游水压力和侧向水压力,实践证明对于此种荷载采用机械杠杆系统加载均可以满足要求。

弧形闸门作用于牛腿的集中推力是用砝码通过金属丝绕过滑轮,再作用于牛腿垫块上的杠杆来实现的,垫块金属板按其轴线与水平成8度50分的方向放置,以保证与实际弧门支腿作用力的方向严格相似。作用于闸墩上水压力和侧水压力,在试验中将之简化为阶梯状的均匀分布水压,每一阶梯的受压面用一面积和形状与之相同的6毫米厚的钢板垫上薄橡皮和照相纸,再经过杠杆系统用砝码通过金属丝绕过滑轮,按水平方向拉它来实现的,见图2。

为了充分了解闸墩的应力状态,分别考虑了下列受力情况:

- (1) 闸墩两侧同时关闭,其两侧牛腿皆承受弧门传来的集中力;
- (2) 闸墩一侧关闭,牛腿承受一侧弧门传来的支腿集中力;
- (3) 闸墩上游墩头承受水压力作用;
- (4) 闸墩闸门上游部分承受侧水压力;
- (5) 闸墩自重作用。

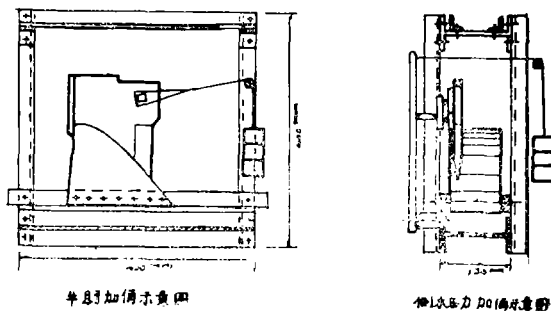


图2 牛腿加载示意图 侧水压力加载示意图

以上试验均采用冻结法加载,加载冻结时,为了防止模型材料产生过大的蠕变,升温阶段应稍为快些,并在恒温时施加荷载,模型冻结在烘箱内进行。

3、观测与计算

为了减少工作量,同时又满足研究工作的需要,本试验的模型切片分A、B、C三类。通过A类切片可以得到闸墩表面的应力分布状态和主应力迹线;通过B类切片可以得到牛腿中心截面的应力分布状态和主应力迹线;通过C类切片可以得到侧水压力作用时堰顶、弧门顶外

闸墩与坝体相接部分的应力值。

对切片用正射法求边沿正应力，正应力的正负号依据压钉法进行判断。小数级条纹采用旋转分析镜法进行测读。

采用切力差法计算各应力量值和主应力值。

当模型为单连域和不受体力作用时，AB线上任一点*i*的平衡微分方程为（图3）：

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

积分后任一点*i*处的应力

$$(\sigma_x)_i = (\sigma_x)_a - \int_a^i \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx \quad (2)$$

采用差分形式则有

$$(\sigma_x)_i = (\sigma_x)_a - \sum_a^i \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x \quad (3)$$

$$\text{即 } (\sigma_x)_i = (\sigma_x)_a - \sum_a^i \Delta \tau_{xy} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (4)$$

式中 $(\sigma_x)_a$ 为初始值，由边界条件和边界条纹序数求得。

$\Delta \tau_{xy}$ —— 所求截面上、下辅助截面上（1—1及2—2）剪应力差值。

Δx —— 截面上求应力点间的距离。

Δy —— 所求截面处上、下辅助截面间的距离。

对切片进行正射所得的应力条纹图将给出此切片中所有点的次主应力差值，即 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 之值；所得的等倾线将给出切片内次主应力与水平轴的夹角 θ ，则切片上任意点的剪应力可按式求得

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta \quad (5)$$

因而可以求得间距为 Δx 内剪应力的平均差值 $\Delta \tau_{xy}$ 。

根据莫尔圆有：

$$\begin{aligned} (\sigma_x - \sigma_y)_i &= (\sigma_1 - \sigma_2)_i \cos 2\theta_i \\ &= 2fnc \cos 2\theta \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \therefore (\sigma_y)_i &= (\sigma_x)_i - (\sigma_1 - \sigma_2)_i \cos 2\theta \\ &= (\sigma_x)_i - 2fnc \cos 2\theta_i \end{aligned} \quad (7)$$

式中 f 为模型条纹值

于是可以求得切片内各点的应力分量 σ_x 、 σ_y 及 τ_{xy} 。

切片上各点的主应力按下式求得

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (8)$$

由水平轴X逆时针方向旋转至主应力方向的夹角 θ_p 为：

$$\tan 2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (9)$$

应力换算按下式计算

$$\sigma_{\text{原型}} = \frac{K_3}{K_1 K_2} \sigma_{\text{模型}} = \frac{q_{\text{原型}}}{q_{\text{模型}}} \sigma_{\text{模型}}$$

式中 K_1 : 长度相似系数, 为 $\frac{200}{1}$
 K_2 : 厚度相似系数, 为 $\frac{200}{1}$
 K_3 : 外力相似系数 3×10^6

三、试验成果与分析

(一) 闸墩两侧闸门关闭 (即对称荷载情况)。

1. 开始我们按设计单位给的最初方案制造了一个模型, 按牛腿上承受弧门支腿力进行试验, 经加载冻结后进行观测, 发现在牛腿后的闸墩下游边出现较大的拉应力, 其值为 13 公斤/厘米² 左右。据分析认为主要是牛腿离闸墩下游边太近, 弧门每个支腿传来的集中力为 750 吨, 而闸墩下游边是自由的, 无任何支承, 刚度小, 因此出现较大的变形和拉应力。为此我们建议设计单位将下游闸墩加长, 经实验证明, 闸墩加长 1.5 米后, 该处拉应力约为 7~8 公斤/厘米²。以后的模型均按修改后的尺寸 (即图 1 所示的尺寸) 制作。

2. 对称荷载情况, 分三种荷载加载, 然后叠加, 即: a、闸墩仅受两侧弧门支腿传来的集中力, b、上游墩头水压力, c、闸墩自重。总共试验了四个模型, a 情况冻结了 2 个模型, 用以得到 A 型切片和 B 型切片, b 情况冻结了一个模型, 得到 A 型切片, c 情况冻结了二个模型。

a 情况时: 根据切片的等倾线和等色线进行计算得成果列于表 1 和表 3。

b 情况时: 根据切片的等色线和等倾线进行计算得成果列于表 1 和表 3。

c 情况时: 根据切片的等色线和等倾线进行计算得成果列于表 1 和表 2。

将以上三种情况进行叠加, 计算成果列于表 1 和表 3, 图 4 为主应力迹线, 图 5 为最大主应

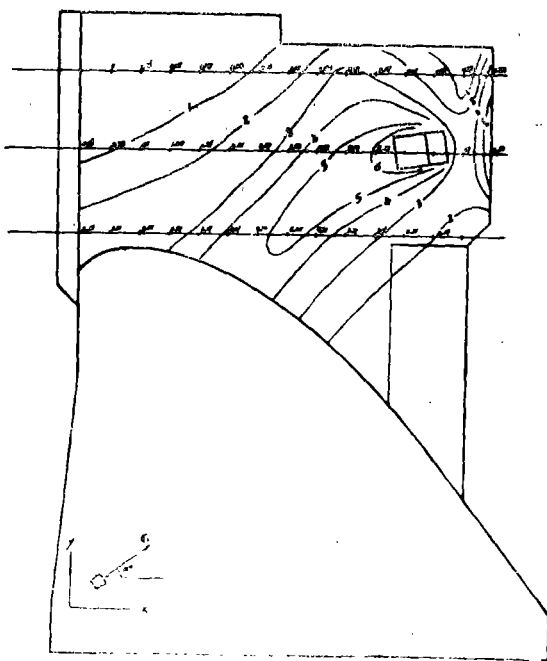
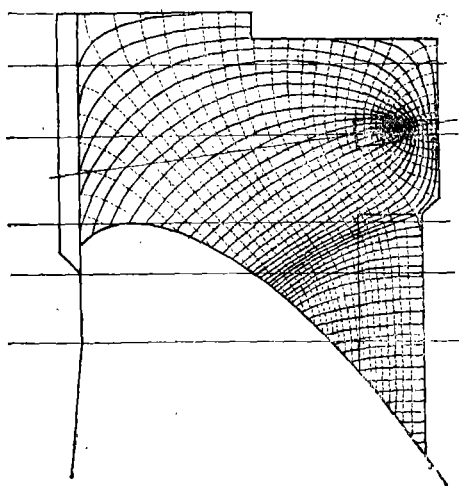


图 4 双侧牛腿对称加载时闸墩主应力迹线 图 5 双侧腿加载时闸墩主应力 σ_1 等值线图 (kg/cm)

力等值线图。

从以上资料可以看出：

(1) 闸墩上游水压力和闸墩自重的影响较小，主要为弧门支腿作用力的影响，最大拉应力达7公斤/厘米²（不包括靠近牛腿部分的拉应力值）。此拉应力实际上为3毫米厚切片的平均应力，我们曾将此切片逐步磨薄，观测到在此范围内应力梯度较大，闸墩表面的实际拉应力 σ_x 约为该平均值的1.5倍。

(2) 由于对称荷载的作用，在牛腿上游部的闸墩内有一个拉应力较大的区域，拉应力为6~12公斤/厘米²（不包括牛腿与闸墩连接处的应力集中值），此范围的大小与牛腿尺寸、牛腿距坝顶的距离、闸墩厚度和作用力的大小和方向有关。从试验成果可以看出，大致范围为：上限为通过牛腿A点的水平线，下限为通过牛腿B点且与过B点的水平线成50度角的斜线，以O点为圆心3.5h（h为牛腿高）为半径的扇形面积（见图10），主拉应力的走向大致与过O点的水平线成30度角。

(3) 对称荷载作用时，弧门支腿集中力对闸墩与坝体连接的上游部分（如高程100米以上）有较大的影响，最大主拉应力在4公斤/厘米²以上。

3. 图6为过牛腿中心线切片的主应力迹线和应力分布，有关截面的应力分量计算值列于下表。

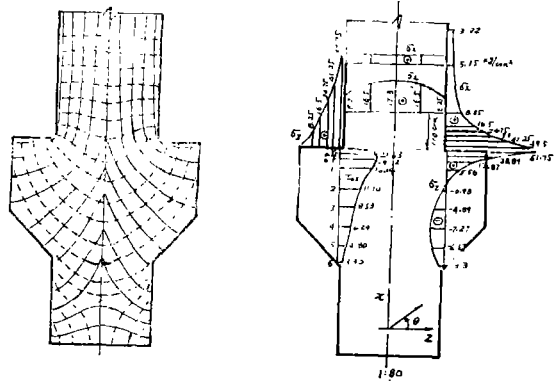


图6牛腿中心线切片主应力迹线和应力分布图

牛腿与闸墩交接面处 σ_z 、 σ_x 、 τ_{xz} 、 σ_1 、 σ_2 及 θ 值

点号	0	0.25	0.5	1	2	3	4	5	6
σ_x	0			-1.320	-4.999	-9.092	-11.567	-12.062	-10.989
σ_z	51.57	28.894	17.856	5.541	-0.975	-3.885	-7.268	-7.666	-3.300
τ_{xz}	0	20.632	19.146	16.139	11.103	8.528	6.240	4.803	3.300
σ_1	51.57			18.610	8.296	3.087	1.086	0.913	0
σ_2	0			-14.390	-14.271	-15.063	-16.026	-15.814	-7.689
$\theta_{左}$	0°			-39°	-37°	-35°	-35.5°	-38°	-45°
$\theta_{右}$	0°			39°	37°	35°	35.5	38°	45°

说明：1、应力单位为公斤/厘米²，拉应力为 \oplus ，压应力为 \ominus

2、 $\theta_{左}$ 、 $\theta_{右}$ 表示右或左牛腿与闸墩交接面上主应力的方向

从以上资料可以看出:

(1) 牛腿与闸墩交接面上的上游端出现较大的拉应力, 下游端为压应力, 中和轴位置距上游端约为 $\frac{1}{4}h$, 整个交接面上的应力分布形式与深梁相似。实测最大拉应力为 $\sigma_z = 51.75$ 公斤/厘米²。按普通矮梁计算 $\sigma'_z = \frac{6M}{bh} = \frac{6 \times 750 \times 60 \times 1000}{220 \times 350 \times 350} = 10$ 公斤/厘米², 实测最大拉应力为其5倍, 表现出强烈的应力集中现象。

(2) 交接面上的最大剪应力 $\tau_{xz} = 20.63$ 公斤/厘米², 为平均剪应力 $\tau'_{xz} = \frac{Q}{bh} = \frac{750 \times 1000}{220 \times 350} = 9.8$ 公斤/厘米² 的2.1倍, 剪应力在上游端集中, 而在下游端较小, 使牛腿的应力状况恶化。

(3) 在牛腿上游端附近的闸墩面上也出现严重的应力集中现象, 最大拉应力达49公斤/厘米², 此处强拉应力的集中范围约为牛腿宽度的1倍。

(二) 闸墩一侧关闭, 一侧溢流 (即非对称荷载情况)

1. 非对称情况分为四种作用荷载, 然后进行叠加, 四种作用荷载, 即a、闸墩一侧承受弧门支腿传来的集中力, b、闸墩上游水压力, c、闸墩自重, d、弧门以上闸墩承受两侧水压力差。

对于a种情况加载冻结了两个模型, 一个模型沿闸墩的受拉侧和受压侧切取了A型切片, 对另一个模型沿牛腿中心线切取了B型切片。对于d种情况加载冻结了一个模型, 用以得到C型切片, 其它两种情况已有资料。

2. a 种情况中牛腿未受力一侧闸墩表面为压应力, 其值很小; 而在牛腿受力侧闸墩表面为拉应力, 根据观测到的等色线和等倾线图计算所得应力分量值列于表2。单侧牛腿受力, 闸墩上游水压力和自重叠加后有关截面上的 σ_x 、 σ_y 及 τ_{xy} 的叠加应力分量计算成果列于表2和表3, 图7为主应力迹线图, 图8为最大主应力等值线图。

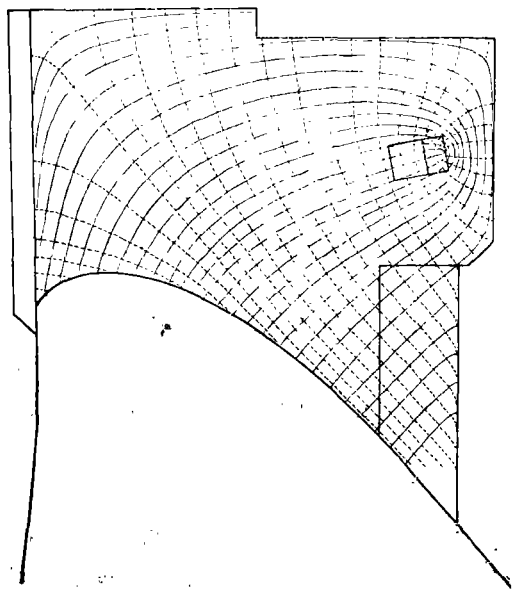


图7 单侧牛腿加载时闸墩切片主应力迹线图。加载时切片厚 $\delta = 4$ mm。

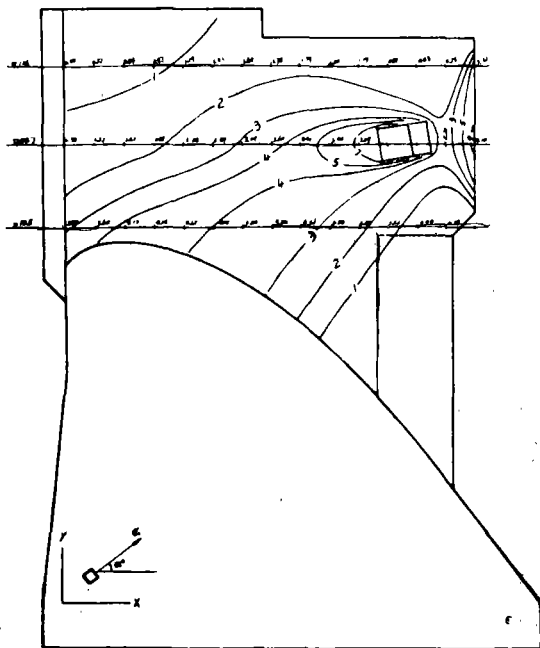


图8 单侧牛腿加载时闸墩主应力 σ_1 等值线图 (kg/cm²)

3. a种情况下, 根据沿牛腿中心线切片观测到的等色线和等倾线图计算所得的主应力迹线和有关截面的应力分布示于图9, 有关截面的应力分量计算值列于下表:

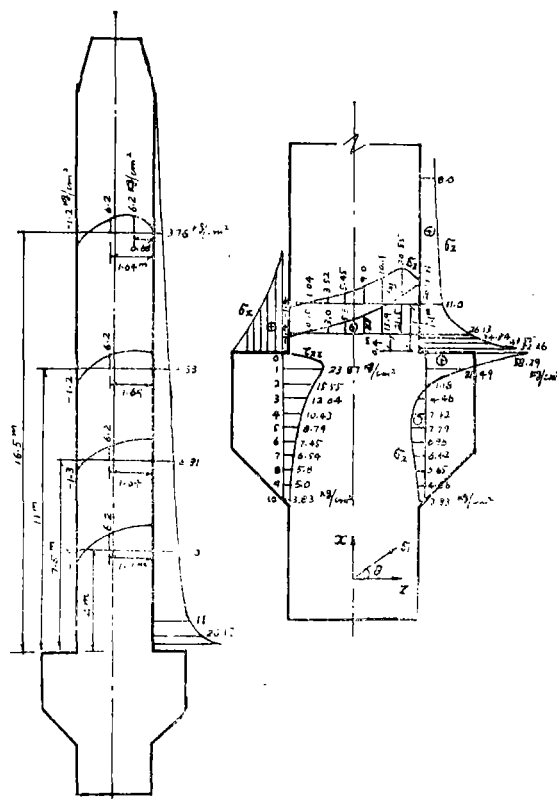


图9 沿牛腿中心线切片应力分布图 (非对称荷载)

3. 对d种情况沿坝顶和弧门顶的垂直切片观测, 得到的等色线和边沿应力, 示于图10

4. 根据以上资料分析, 可以得到如下几点:

(1) 在非对称荷载作用下, 仍然是作用于单侧牛腿的弧门推力起主要作用。

(2) 在非对称荷载作用下, 闸墩受偏心受拉作用。牛腿不受力侧的闸墩表面受压, 受压层厚度约为25~30公分, 最大压应力为1~2公斤/厘米², 这是由于闸墩厚为3米, 刚度较大的缘故。

(3) 牛腿承受弧门推力侧的闸墩表面为拉应力, 其实际应力亦大致为切片平均应力的1.5倍左右。同样, 在牛腿上游端有一拉应力较大的区域 (实际应力为6—12公斤/厘米²), 它比对称荷载更倾向于下游, 其大致范围为: 上限为过牛腿A点的水平线, 下限为过牛腿B点且与过B点的水平线成60度角, 以O点为圆心, (3.5~4)h为半径的扇形区, 主拉应力的方向大致与过O点的水平线成35度角 (见图10)。

沿牛腿与闸墩交接面 $\sigma_z, \tau_{xz}, \sigma_x, \sigma_1, \sigma_2$ 及 θ 值

点号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
σ_z	58.29	21.49	1.88	-4.46	-7.42	-7.79	-6.96	-6.41	-5.65	-4.66	-3.83
τ_{xz}	0	23.87	17.55	12.09	10.42	8.79	7.45	6.54	5.80	5.00	3.83
σ_x	0	-5.09	-9.87	-9.40	-8.75	-7.23	-6.19	-5.42	-4.98	-4.59	-3.83
σ_1	58.29	35.52	14.50	5.41	2.35	1.28	0.88	0.64	0.49	0.37	0
σ_2	0	-19.12	-22.50	-19.28	-18.52	-16.30	-14.03	-12.68	-11.12	-9.63	-7.66
θ 左	0°	-30.45°	-35.74°	-39°	-43.69°	-44.09°	-43.75°	-42.81°	-43.34°	-44.82°	-45°
θ 右	0°	30.45°	35.74°	39°	43.69°	44.09°	43.75°	42.81°	43.34°	44.82°	45°

说明: 1、应力单位为公斤/厘米², 拉应力为 \oplus , 压应力为 \ominus

2、 θ 右, θ 左表示右或左牛腿与闸墩交接面上的主应力方向。

(4) 在牛腿与闸墩交接处, 闸墩部份有一拉应力集中区, 其长度为1.0倍牛腿宽度, 最大应力值达52.26公斤/厘米²。

(5) 在承受弧门推力的牛腿与闸墩交接面上的应力状态, 与对称荷载情况相似, 但由于外力不对称, 引起一“附加”扭矩, 致使该处应力集中更加严重, 应力状态更为恶化。最大剪应力为23.87公斤/厘米²为对称情况的1.2倍, 为平均应力的2.44倍。最大拉应力为58.29公斤/厘米², 为对称情况的1.13倍, 为按矮梁计算的5.8倍。而且拉应力更集中于交接面的上游端, 中和轴距交接面为 $\frac{1}{4}h$ 。

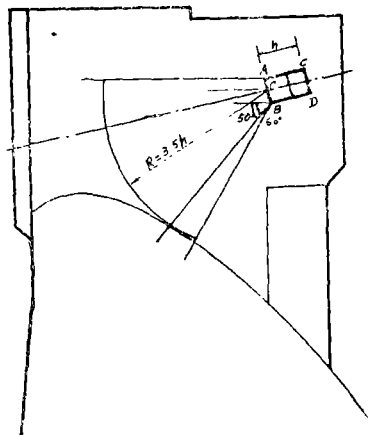


图 10

(6) 从图11可以看到, 当侧水压力作用时, 坝顶和弧门顶闸墩与坝交接处出现应力集中, 最大拉应力高达20公斤/厘米²左右, 值得注意。

6. 我们在第一次进行非对称性荷载作用冻结模型时, 由于所加的力较大, 牛腿处发生裂缝。裂缝发生在牛腿的下角, 沿交接面向上延伸, 同时大致沿牛腿与闸墩交角的平分角线 (即45度) 向闸墩内延伸, 见图12。

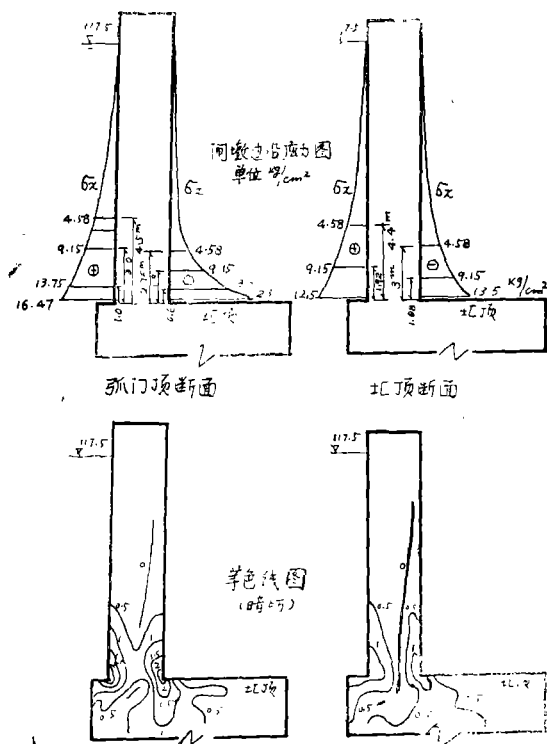


图 11



图 12

(三) 自重应力

由于闸墩较厚, 需要考虑其自重对应力分布的影响。模拟自重采用离心机加荷, 可以较准确地反映自重作用情况, 模型比例为1:200。自重应力的换算系数用压杆试件与模型同时放入离心盒内, 进行加荷, 为了离心加荷的可靠性, 在离心机的两臂同时放置两个相同的模型, 经旋转后在光弹仪中进行观测, 二者所得的应力条纹完全相似, 证明试验是可靠的。

材料条纹值 f 按下式计算:

$$f = \frac{\gamma_m N h t}{n i}$$
$$N = \left(\frac{n \pi}{30} \right) \frac{R}{g}$$

式中 γ_m ——环氧树脂比重

N ——模化比

h ——矩形压杆试件某处产生 n_i 级条纹的相应高度。

t ——矩形压杆的厚度

n ——离心机每分钟转数

R ——离心机旋转臂平均半径

g ——重力加速度

模型应力换算成原型应力按下式计算:

$$\sigma_H = \frac{K_r K_L}{N} \sigma_M$$

式中 σ_H ——原型应力

σ_M ——模型应力

$$K_r = \frac{\gamma_H}{\gamma_M} \text{——原形材料与模型材料单位体积重量比}$$

$$K_L = \frac{L_H}{L_M} \text{原型与模型几何相似系数使用离心机采用冻结法施加自重。}$$

使用离心机采用冻结法施加自重。

自重试验是在武汉水电学院的离心机上进行的, 使用时离心机平均直径193厘米, 离心机转速选用305转/分, 计算所得的模化比 $N = 200$ 。

通过矩形压杆试件求得的材料条纹值为

$$f = 0.3$$

根据自重试验观测到的等色线和等倾线, 自重应力计算值列于表1中, 从所求得的值可以看出自重产生的应力虽然不大, 但对改善应力状况是有利的。

四、结 语

根据以上的实验成果和分析, 归纳得初步结论如下:

1. 由于闸墩牛腿承受孤门传来的很大的水推力, 如果牛腿后闸墩的长度太小, 则闸墩下游边会由于自由变形而产生过大的拉应力, 致使该处产生裂缝, 影响牛腿的安全。为了保证

牛腿后闸墩的支持作用,建议牛腿的下游端至闸墩下游边的最小距离应大于(1~1.5)倍牛腿的高度。

2.从总体情况看,非对称荷载时的应力状态较对称荷载时恶化,主要是由于单侧荷载作用时出现“附加”的扭矩而引起的,设计一般应以非对称荷载作为控制情况。本试验中由于闸墩较厚,刚度大,因而没有引起过大的弯曲应力,可见对于大跨度的弧形闸门采用稍厚的闸墩宽度是有利的。

3.由于牛腿的存在,牛腿上游端附近的闸墩出现强烈的应力集中区,拉应力一般为15~50公斤/厘米²,因此该处需要特别加强,加强的范围约为1倍牛腿宽度。

4.当弧门推力作用时,由于牛腿和坝体的影响,闸墩在此范围内存在一个强拉应力区(即拉应力为6~12公斤/厘米²),可能使闸墩表面产生裂缝。此拉应力区的范围为:上限为过牛腿A点的水平线,下限为过牛腿B点且与过B点的水平线成60度的斜线,以O点为圆心,(3~3.5)牛腿高度为半径的扇形区域(见图6)。此区域内主拉应力的方向大致与过O点的水平线成30度~35度角。

5.关于牛腿设计

(1) 由于在牛腿和闸墩交界面的上游端出现较大的剪应力集中,所以过长地增加牛腿顺水流方向的长度是无意义的。

(2) 在牛腿与闸墩交界面上正应力 σ_x 的分布与深梁近似,拉力区主要靠近上游端,且剪应力集中,故为了防止开裂,此处应布置足够的斜拉钢筋。由于该处应力状态比较复杂,最好是采用模型试验确定应力分布,然后计算斜拉钢筋或水平向钢筋。钢筋应放在靠近牛腿上游面,因下游面剪应力小,将钢筋布置于此则作用不大。

若无试验资料时,可按全部切力的 $\frac{3}{4}$ 由钢筋承担,来计算斜拉钢筋的配置量,其余部份由牛腿下游部份混凝土来承担。

或者假定 σ_x 和 τ_{xz} 的分布如图13所示,并假定 $\sigma_y = 0$,据此应力图形算出斜拉力并进行斜拉力配筋计算。

$$\tau' = \frac{Q}{bh}, \quad \sigma' = \frac{3M}{bh^2}$$

Q——牛腿承受的总切力

M——牛腿承受的弯矩

b, h——牛腿的宽和高

6.作用于牛腿上的弧门推力在闸墩与坝体交界处产生拉应力,特别是弧门顶处上游的侧水压力,在堰顶和弧门顶之间坝墩交界处产生较大的拉应力,最大达20公斤/厘米²,设计时应特别加以注意。

参 考 文 献

- [1] M·M·费罗赫特《光测弹性力学》
- [2] 武汉水电学院光弹试验室《用硅橡胶模子浇铸三向光弹模型》
- [3] 天津大学力学教研室《光弹性原理及测试技术》

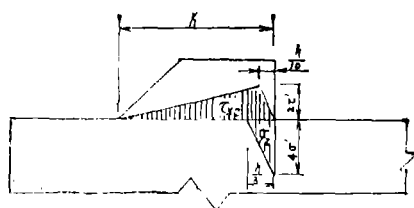


图13 σ_x 和 τ_{xz} 的分布图